

# 长焦距航空遥感器过载载荷下的光机集成分析

徐钰蕾<sup>1</sup> 田海英<sup>1</sup> 刘 剑<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 环境载荷引起的航空遥感器光机系统变形对遥感器的光学系统性能会产生严重的影响。为了评估这种影响, 需要一种将结构分析和光学分析相结合的有效手段。利用光机集成分析方法, 首先建立了长焦距航空遥感器的有限元模型并进行了静力学分析, 针对整个航空遥感器系统分别给定航向、展向和法向的加速度载荷, 仿真分析了航空遥感器在机载飞行中的变形情况, 重点分析由环境载荷、支撑结构所导致的各光学元件的表面节点位移变化, 并以 Zernike 多项式为接口拟合各光学元件的镜面变形, 将计算出的拟合系数代入光学分析软件对遥感器系统进行光机集成分析, 评估指定环境载荷对该遥感器结构的光学系统性能的影响。分析结果表明, 该航空遥感器在过载情况下, 遥感器整体系统工作状态的光学调制传递函数在空间频率为 0~62.5 cycle/mm 范围内不低于 0.16, 经光学核算满足成像要求。

**关键词** 光学设计; 光机集成分析; 航空遥感器; 调制传递函数; 环境载荷

中图分类号 TL67 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.082203

## Intergrated Opto-Mechanical Analysis of a Long-Focus Airborne Camera under Overloads

Xu Yulei<sup>1</sup> Tian Haiying<sup>1</sup> Liu Jian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The deformation of opto-mechanical system caused by environmental load should have a serious influence on the performance of the airborne camera. In order to evaluate this influence, an effective technique for intergrated opto-mechanical analysis is required. The finite element model of the airborne camera is established and the static analysis is accomplished. Under the given environmental loads, including heading acceleration, spanwise acceleration and normal acceleration, simulation and analysis are carried out on the deformation of the structure of airborne camera, especially on the deformation of the lens caused by environmental loads and the support structure. Zernike polynomial is used as an interface tool to fit deformed mirror surface and Zernike coefficients are substituted into optical design software for the intergrated opto-mechanical analysis. The influence of the given environmental loads on optical performance is evaluated. The analysis results show that under the given environmental loads the modulation transfer functions (MTF) of airborne camera's optical system in all fields of views are not less than 0.16 with spatial frequency from 0 to 62.5 cycle/mm, which can meet the image quality demand under the given environmental loads.

**Key words** optical design; intergrated opto-mechanical analysis; airborne camera; modulation transfer function; environmental load

**OCIS codes** 220.4880; 120.4880; 200.4880

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-04-16; 网络出版日期: 2014-07-03

基金项目: 国家林业公益性资助项目(201204515)

作者简介: 徐钰蕾(1984—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事航空遥感器光机集成分析方面的研究。

E-mail: snowjijl@hotmail.com

## 1 引言

在传统的光机结构设计中,光学分析和结构分析是相互分离的。光机系统的结构设计在设计阶段是按照光学设计时提出的要求完成的,结构设计结束后无法快速直接地测评设计结果对光学系统成像质量的影响,这致使设计一个合理的光机系统非常耗时耗力。光机集成分析同时对光学系统以及光机结构在工作环境下进行模拟分析,判断系统是否满足设计要求。最近几年,光机集成分析的思想与方法逐渐被人们所接受,其中美国国家宇航局 Langley 研究中心在“哈勃”太空望远镜、5 m Hale 光学探测器、10 m Keck 光学探测器<sup>[1-4]</sup>等多种空间光学遥感器的研制过程中应用了光机集成分析技术。我国光机集成分析技术研究起步稍晚,在空间太阳望远镜、空间遥感器等领域的设计也开始采用光机集成分析方法与技术<sup>[5-8]</sup>。这些工作主要都是针对空间遥感器的,而在航空遥感器方面的应用较少,空间遥感器在轨工作期间环境条件稳定,而航空遥感器环境条件较空间遥感器复杂和严酷,因此对航空遥感器的集成分析需求尤其迫切。

航空遥感器作为航空侦察观测的主要载荷形式之一,是获取地面信息的重要技术手段,对于航空遥感器这种光、机、电、热、控制的多学科综合系统,其设计阶段进行集成化设计分析显得尤为重要。长焦距航空遥感器安装在飞机上对地面成像,该遥感器焦距长、体积大、内部结构复杂,其光学性能在很大程度上受外在的环境载荷影响,因此,力学环境、光机加工、光机装调、温度环境对总体指标的影响错综复杂。通过光机集成分析,可以在设计阶段对各种因素分析计算,并进一步优化,降低研制风险<sup>[9-13]</sup>。

根据长焦距航空遥感器的调制传递函数(MTF)要求,分析了该航空遥感器分别在给定航向、展向和法向加速度环境载荷作用下,遥感器结构和各光学元件的变形,通过 Zernike 拟合<sup>[14-15]</sup>得到遥感器系统在环境载荷下的光学调制传递函数,为长焦距航空遥感器的研制提供参考。

## 2 光机集成分析流程

以长焦距航空遥感器为例,应用光机集成分析方法,实现遥感器系统在环境载荷作用下的光学性能评估。光机集成分析是在各种载荷作用下,分析光机系统中光学元件及其支撑结构的变形,光学元件变形包含刚体位移和表面畸变,光学元件的刚体位移将影响光学系统的离焦、离轴、倾斜,光学元件表面畸变将影响光学系统的像差。光机集成有限元分析方法就是通过分离三种形式的刚体位移和光学表面畸变的峰谷值和均方根值,集成研究将数据转换成光学分析软件 CODE V 等可接收的数据形式,对光机系统做整体成像性能评价,同时指导光机系统的设计、误差分配和装调。图 1 为本文采用的光机集成分析流程图。

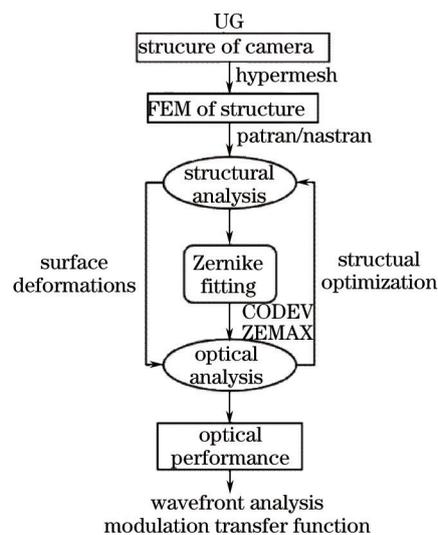


图 1 光机集成分析流程图

Fig.1 Conspectus of intergrated opto-mechanical analysis

首先,根据光学设计给出的尺寸建立 UG 结构模型,然后利用 HyperMesh 建立结构分析的有限元模型,通过 Patran/Nastran 有限元分析软件计算出遥感器结构在环境载荷作用下引起的光学元件的镜面变形量,并以 Zernike 多项式为接口拟合镜面位移,将计算出的 Zernike 拟合系数代入光学分析软件 CODE V 中进行

光学分析,对系统的光学调制传递函数进行评价,评估环境载荷对遥感器系统光学性能的影响。光机集成分析过程中,需要根据光学分析结果进行多次的反复修改和结构优化,直至调制传递函数指标达到成像任务要求,从而实现长焦距 CCD 航空遥感器的光机集成分析。

### 3 某长焦距 CCD 航空遥感器的光机集成分析

#### 3.1 有限元分析

利用有限元分析软件建立航空遥感器的结构分析有限元模型,如图 2 所示。整机结构的薄壁件采用四边形壳单元进行划分,厚度相对较大的零件采用六面体实体单元进行划分,其他的连接部件进行合理的简化处理,航空遥感器的内部电子元件等的质量均采用等效质量点和多点约束单元进行等效连接,网格划分过程中采用手动划分网格形式,以保证实时检查网格质量,对质量不良的网格进行手动调整修改。图中整机结构网格共有单元 76212 个,节点 79352 个,赋予材料和单元属性后的整机网格质量与实际航空遥感器的质量相差不到 10%,主要误差来源于各部件间的连接螺钉等简化部件。

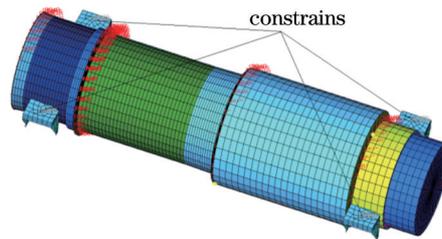


图 2 遥感器结构的有限元模型

Fig.2 Finite element model of the camera

针对环境载荷以及遥感器结构对长焦距航空遥感器光学系统性能的影响,在施加边界约束条件和环境载荷后,对遥感器进行静力学分析,可以计算出遥感器结构及其中光学系统每一块光学元件表面节点的位移变化。图 3 是航向加速度载荷  $+1.5g$ 、 $-2.0g$ ,法向加速度载荷  $+4.0g$ 、 $-3.5g$ ,展向加速度载荷  $+2.0g$ 、 $-2.0g$  作用下遥感器结构系统的变形云图,从图中可以提取每个光学元件的镜面节点位移,利用 Zernike 多项式进行拟合,可以得到光学元件的刚体位移和表面变形。在环境载荷为航向加速度  $1.5g$  情况下,计算得到航空遥感器中各光学元件的刚体位移,包括光学元件的三向平动量和三向转动量,限于篇幅关系,表 1 中只给出了光学元件前 7 个镜面的刚体位移。同时,提取每个光学元件的表面节点位移进行 Zernike 拟合,表 2 列出了前两个镜面的前 8 项 Zernike 系数,以便后续将 Zernike 系数代入光学设计软件进行光学分析。

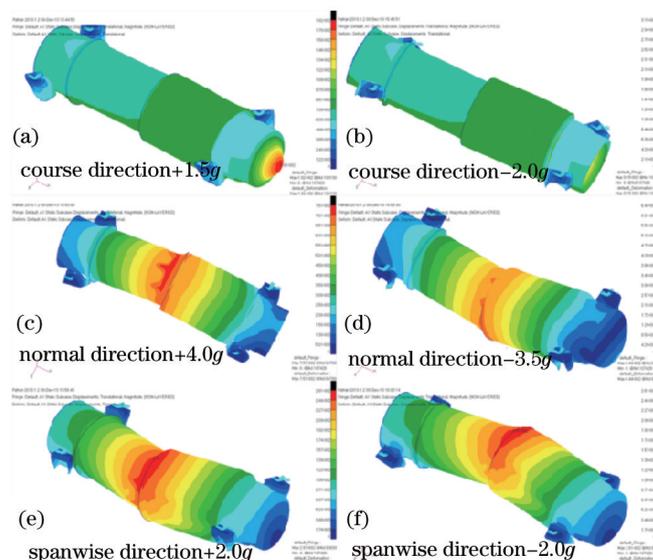


图 3 指定环境载荷下遥感器结构的变形云图

Fig.3 Deformations of the camera system caused by the given environmental load

表1 前7个镜面的刚体位移值

Table 1 Rigid body displacement of the first eight surfaces

	1	2	3	4	5	6	7
Translation along $x$ -axis /( $10^{-6}$ m)	-3.57	-0.393	-0.391	-2.58	-2.44	-2.42	-2.36
Translation along $y$ -axis /( $10^{-6}$ m)	0.303	2.65	2.59	-0.390	0.593	-0.385	-0.384
Translation along $z$ -axis /( $10^{-6}$ m)	9.62	9.32	9.32	9.28	9.28	9.26	9.27
Deflection about $x$ -axis /( $10^{-6}$ rad)	0.192	-0.227	-0.227	0.00508	-0.0823	0.00504	0.00503
Deflection about $y$ -axis /( $10^{-6}$ rad)	0.341	-0.00429	-0.00429	-0.227	-0.212	-0.227	-0.227
Deflection about $z$ -axis /( $10^{-6}$ rad)	-0.195	0.328	0.328	0.326	0.325	0.325	0.324

表2 前2个镜面的前8项Zernike系数

Table 2 First eight Zernike coefficients of the first two surfaces

	1	2	3	4	5	6	7	8
1st surface	$-2.53 \times 10^{-3}$	$-5.14 \times 10^{-4}$	$4.11 \times 10^{-4}$	$-3.92 \times 10^{-3}$	6.7	0.134	$7.75 \times 10^{-3}$	0.1
2nd surface	$3.53 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-4}$	$-4.15 \times 10^{-4}$	$4.7 \times 10^{-5}$	-6.75	0.13	$-7.05 \times 10^{-3}$	-0.102

3.2 不同载荷下光学传递函数分析

本长焦距航空遥感器光学系统的入瞳直径为200 mm,相对孔径为8,工作波段为380~700 nm,光学元件材料采用K9,ZF7、TF3、ZK10,设计的光学系统加工装调后的调制传递函数在空间频率为0~62.5 cycle/mm范围内不低于0.35,如图4(a)所示。

将有限元分析结果处理后得到光学元件的间隔变化量和镜面变形的Zernike系数等代入到光学设计软件CODE V中,得到上述各种环境载荷作用下遥感器系统的光学传递函数,如图4所示。

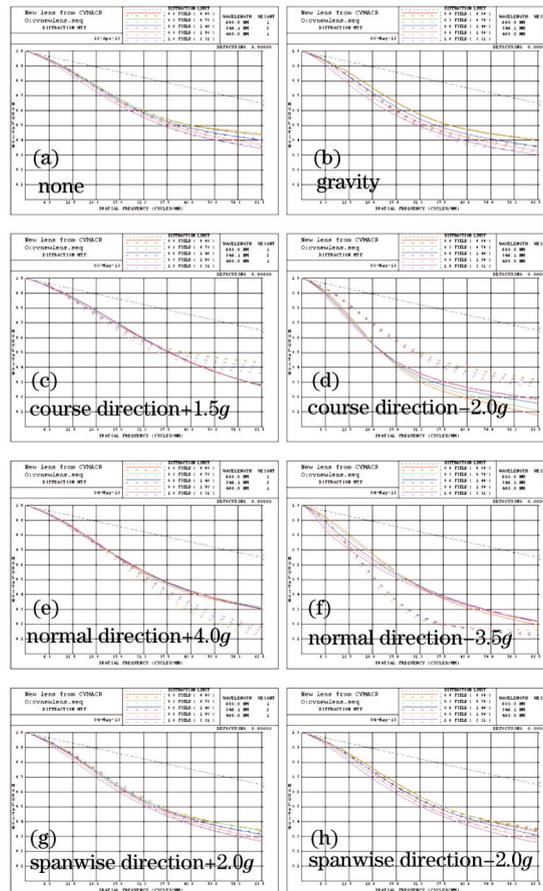


图4 指定环境载荷下遥感器系统的光学传递函数曲线比较

Fig.4 MTF curves of the camera system under the given environmental load

图4中比较了遥感器系统原设计的光学传递函数和只加载重力情况下的光学传递函数,以及加载了航

向加速度载荷+1.5g、-2.0g,法向加速度载荷+4.0g、-3.5g,展向加速度载荷+2.0g、-2.0g情况下的光学传递函数。从图4中可以看出,在纯重力载荷作用下,遥感器系统的光学传递函数有少量下降,但始终高于0.3,完全符合成像需求。在分析的几种过载环境下,遥感器系统的光学传递函数存在不同程度的下降,在法向+4.0g和法向-3.5g过载环境下系统光学传递函数降到了0.2以下,甚至在航向-2.0g过载环境下系统光学传递函数降到了0.1以下,此时如果不采取其他手段进行改进,光学传递函数低于0.1,已无法满足长焦距航空遥感器的成像需求。

环境载荷作用下,遥感器系统中光学元件的变形主要由刚体位移和表面畸变构成,其刚体位移将影响光学系统的离焦、离轴、倾斜,表面畸变将影响光学系统的像差。上述对光学系统的影响中,离焦影响可以通过调节成像平面的位置来消除,而其他几种影响则不易直接消除。下面分析该遥感器系统在过载情况下光学传递函数的下降是否可以通过离焦补偿来改进。

图5给出了遥感器系统在几种过载情况下,频率为62.5 cycle/mm时的光学传递函数焦深曲线。从图中可以看出,对于加载航向加速度载荷+1.5g、航向加速度载荷-2.0g、法向加速度载荷+4.0g和法向加速度载荷-3.5g的情况时,遥感器系统最佳成像平面位置的偏离量较大;对于加载展向加速度载荷+2.0g和-2.0g的情况,遥感器系统最佳成像平面位置的偏离量较小。分别提取图5中各个环境载荷下遥感器系统最佳成像平面位置偏离量值,即离焦量,列于表3中。对遥感器光学系统依据表3中列出的离焦量进行离焦补偿,得到如图6所示离焦补偿后的系统光学传递函数曲线。

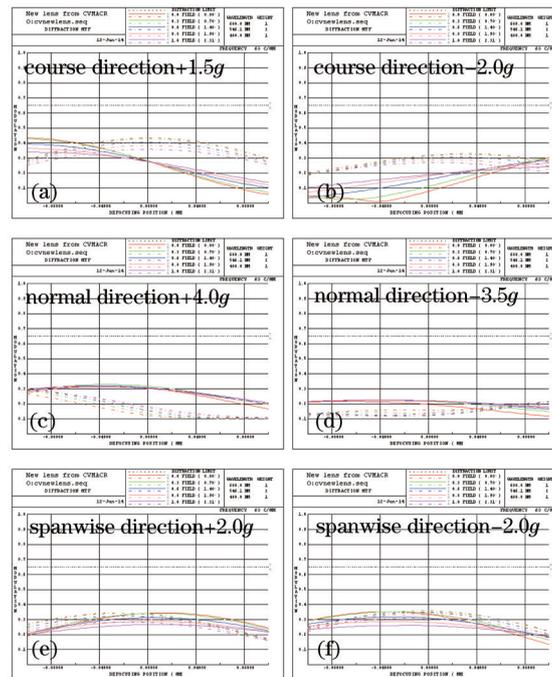


图5 频率为62.5 cycle/mm时遥感器系统光学传递函数的焦深曲线

Fig.5 Curves of focal depth of the camera system's MTF when the frequency is 62.5 cycle/mm

表3 不同环境载荷下遥感器系统最佳成像平面位置偏离量

Table 3 Best imaging plane offset of the camera system under the given environmental load

Environmental load	Course direction +1.5g	Course direction -2.0g	Normal direction +4.0g	Normal direction -3.5g	Spanwise direction +2.0g	Spanwise direction -2.0g
Defocusing distance / mm	-0.058	0.082	-0.104	0.05	-0.002	-0.029

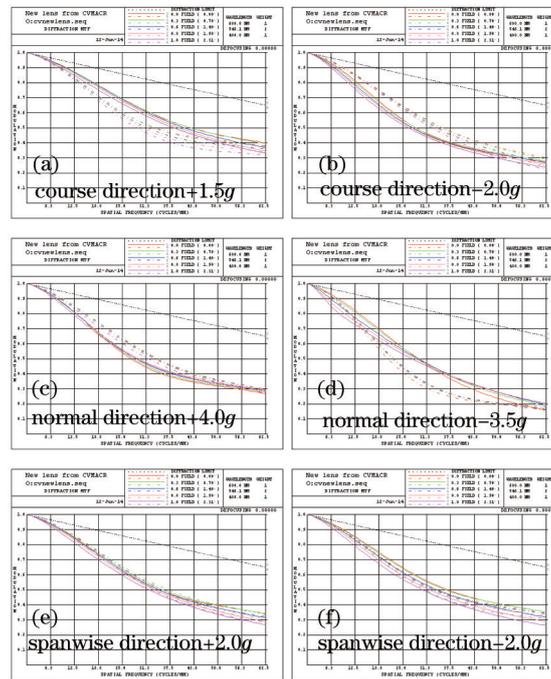


图6 进行离焦补偿后的系统光学传递函数曲线

Fig.6 MTF curves of the camera system after compensating the defocus

从图6中可以看出,进行离焦补偿后,遥感器系统的光学传递函数曲线值有所上升,光学传递函数值均不小于0.16,经过光学核算后,满足成像要求。

## 4 结 论

对于长焦距航空遥感器系统来说,环境载荷对光学系统成像的影响很大。通过光机集成分析技术分析了长焦距航空遥感器在不同环境载荷作用下由于光学元件的镜面变形和光学元件间隔变化等因素造成系统的光学性能变化。分析结果表明,设计的航空遥感器在过载(航向加速度载荷 $+1.5g$ 、 $-2.0g$ ,法向加速度载荷 $+4.0g$ 、 $-3.5g$ ,展向加速度载荷 $+2.0g$ 、 $-2.0g$ )情况下的光学传递函数曲线直接满足成像要求或光学系统经过离焦补偿后其光学传递函数曲线满足成像要求,光机集成分析方法为长焦距航空遥感器的设计提供了参考。

## 参 考 文 献

- 1 Genberg V, Michels J. Opto-mechanical analysis of segmented/adaptive optics[C]. SPIE, 2001, 4444: 330-342.
- 2 Michels J, Genberg V. Design optimization of actively controlled optics[C]. SPIE, 2000, 4198: 81-86.
- 3 Genberg V, Michels J. Making FEA results useful in optical design[C]. SPIE, 2002, 4769: 24-33.
- 4 Pierre Y, Olivia L, John L H. Line-of-sight jitter of the Hubble Space Telescope[J]. SPIE, 1993, 1945: 55-61.
- 5 Shan Baozhong, Chen Entao, Lu E, *et al.*. Thermal/structural/optical integrated analysis of space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 377-381.
- 单宝忠, 陈恩涛, 卢 铿, 等. 空间光仪光机热集成分析方法[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 377-381.
- 6 Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of thermal-structural-optical integrated analysis of space remote sensor[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 913-917.
- 杨 恹, 陈时锦, 张 伟. 空间光学遥感器光机热集成分析技术综述[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 913-917.
- 7 Liu Zhigang, Zhu Jianqiang. Integrated optomechanical analysis of large octagonal Nd:glass support system[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 307-312.
- 刘志刚, 朱健强. 大口径八边形致玻璃片支撑系统的光机集成分析[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 307-312.
- 8 Shi Jianliang, Ren Ge. Integrated analysis and simulation of opto-mechanical system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2866-2870.
- 史建亮, 任 戈. 光机系统集成分析仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2866-2870.

- 9 Wu Mengyuan, Li Yingcai, Hu Yangming, *et al.*. Application of MTF in frame design for optical camera[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0816001.  
吴萌源, 李英才, 胡永明, 等. 调制传递函数在光学相机支撑设计中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0816001.
- 10 Fang Yu, Xiang Libin, Lü Qunbo, *et al.*. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422007.  
方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422007.
- 11 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002.  
韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- 12 Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Opto-mechanical struction design of the space optical hybird based on space coherent laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906008.  
郑阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906008.
- 13 Guo Kang, Gong Yan. Effect of adjusting force on surface figure of optical element in axial adjustment mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123001.  
郭抗, 巩岩. 轴向调节机构中调节力对光学元件面形的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123001.
- 14 Coronato P, Juergens R. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques[C]. SPIE, 2003, 5176: 128-136.
- 15 Yan Jingzhou, Lei Fan, Zhou Bifang. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 7(5): 119-128.  
焉静舟, 雷凡, 周必方. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学精密工程, 1997, 7(5): 119-128.